

# Scuola Officina



MUSEO DEL PATRIMONIO INDUSTRIALE DI BOLOGNA

numero 2 2018

LUGLIO-DICEMBRE

anno XXXVII

ISSN 1723-168X  
Prezzo € 5,00



# La coclea per il sollevamento dell'acqua

## Modelli didattici e recenti aggiornamenti sulla sua storia

GIAN LUIGI AGNOLI, già professore di Meccanica Razionale, Università di Bologna  
PIER GABRIELE MOLARI, già professore di Costruzione di macchine, Università di Bologna

### INTRODUZIONE

■ La coclea, detta anche vite di Archimede, è una macchina molto conosciuta e diffusa. Consiste in una vite, confinata in senso circonferenziale ed inclinata, messa in movimento attorno al proprio asse. Considerata una evoluzione del sollevamento di acqua con catene o con secchi e della pompa detta a rosario o bindolo, ha molteplici impieghi: dal sollevamento di liquidi al trasporto di granulati, al miscelamento di liquidi con solidi e all'escavazione. In quest'ultimo caso, qui non trattato, si parla di trivelle. La sua lunga vita è dovuta alla semplicità di co-

struzione e di impiego, oltre alla modesta manutenzione che richiede, anche in presenza di acque torbide.

Il funzionamento usuale con liquidi o granulati consiste nel separare in "tasche" una quantità di materiale e per ogni giro dell'elica trasportarlo di un passo. La quantità del materiale separato dipende dalle dimensioni e dalla inclinazione dell'elica. Si tratta quindi di una macchina volumetrica. La genialità consiste nel trasformare, senza necessità di impiegare valvole, il moto rotatorio continuo dell'albero in un moto traslatorio discontinuo del materiale.

Tutta la macchina deve essere posta ad una inclinazione inferiore a quella della vite in modo che si possano forma-

re le "tasche" e quindi raramente viene impiegata in presenza di forti prevalenze perché raggiungerebbe notevoli dimensioni; con essa, tuttavia, si possono garantire forti portate.

Può essere costruita con il mantello esterno rotante oppure fisso. Nel primo caso si ha una tenuta statica fra l'elica e il mantello, e l'albero della vite viene sostenuto da cuscinetti, nel secondo l'elica e il materiale strisciano sul mantello stesso mentre la vite spesso viene sostenuta dal mantello stesso e da un cuscinetto reggispira.

Un'altra forma della macchina è dovuta a Taccola e a Leonardo che la disegnano costituita da un cilindro, o da un prisma a base triangolare, con un tubo avvolto ad elica all'esterno. Va precisato che queste due macchine non possono funzionare nel moto lento dato che l'inclinazione della macchina è superiore a quella dell'elica.

Si riscontrano due tipi di funzionamento: uno lento, di impiego classico, e uno veloce, quando il materiale subisce una accelerazione che lo porta a saltare e superare l'accelerazione di gravità per ricadere ad un livello superiore. La macchina veloce può trasportare, anche quasi verticalmente, materiali granulati o granaglie, in questo caso il funzionamento è più simile a quello di una turbomacchina. Essa può essere impiegata anche nel moto inverso, cioè come turbina accoppiata ad un generatore elettrico.

Simms riporta un'ampia ricerca sulle origini e sulla sua evoluzione, in particolare descrive gli infruttuosi tentativi di impiegarla per ottenere un moto perpetuo (Simms 2010). Nel seguito fissiamo l'attenzione sulla macchina tradizionale per sollevare acqua a funzionamento lento.

### LA PATERNITÀ DELL'INVENZIONE

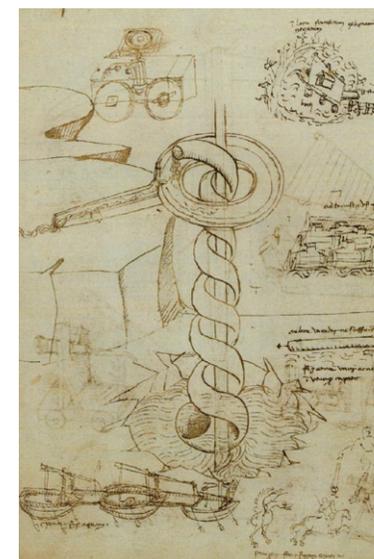
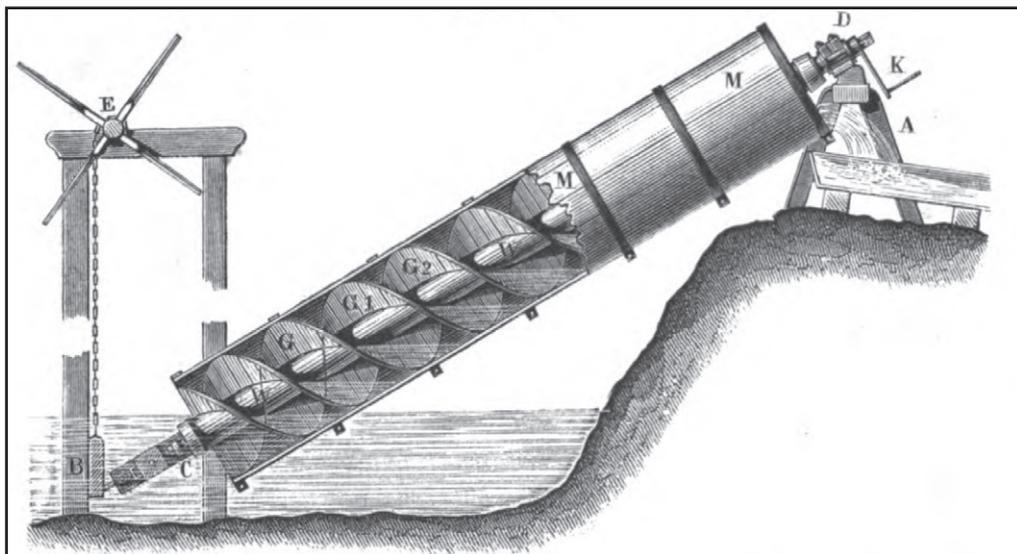
■ Nota fin dai tempi Romani, come attestano terrecotte e affreschi, la macchina viene normalmente attribuita all'invenzione di Archimede (Siracusa, 287 ca-212 a.C.). Vitruvio, verso il 15 d.C., non citandone l'autore, la inserisce fra altre macchine di sollevamento di acqua come la pompa a settori, la pompa con ruota dotata di cassette, o ruota a doppia catena con secchi ad essa appesi, e la pompa aspirante-premente di Ctesibio.

Nel Rinascimento questa macchina è oggetto di grande curiosità, data l'apparente contraddizione che "l'acqua scendendo sale", e impegna le menti più raffinate del tempo per capirne il funzionamento e poterne fornire un modello matematico. In questo studio si impegnano Guido Ubaldo Del Monte (Del Monte, 2013) e lo stesso Galileo Galilei ne è incuriosito come dimostra nella corrispondenza e nei suoi appunti di lezione (Magnini, Molari, 2016). Essa viene inserita nelle formelle che celebrano i successi dell'ingegneria già posti sulla facciata del palazzo ducale di Urbino nel XV sec. (Molari, Molari, 2006) insieme ad altre macchine di sollevamento dell'acqua che, per i tempi nei quali vennero concepite, sembrarono frutto di pensiero innovativo: la macchina a cassette e la macchina a rosario.

Gli studi sulla determinazione della portata della macchina non hanno nel tempo trovato una soluzione analitica di semplice impiego e solo recentemente si sono trovate soluzioni numeriche (Rorres, 2000); tuttora sopravvive una base empirica per il progetto (Waters, Aggidis, 2015). Alcuni studiosi mettono in dubbio che Archimede ne sia

THE COCHLEA FOR PUMPING WATER. TEACHING MATERIALS AND RECENT UPDATES  
The cochlea, also known as Archimedes' screw, is a very well-known and used machine, thanks to its simplicity and usefulness. It consists of a screw, inside helical surface, and is used for the transport of water or grain, for mixing and excavation. This machine is commonly attributed to Archimedes (Siracusa, 287-212 d.C.), but some researchers have argued as being known by Sumerians. Particularly interesting is the pumping process through the formation of pockets, so a transparent external surface would be ideal to appreciate it. The analytical calculation of the cochlea capacity is a difficult problem still discussed by the researchers.

Disegno della coclea in funzione  
Da: Weisbach, 1851-1860



A sinistra: Macchina disegnata da Leonardo presente nel Codice Atlantico, f. 26v.

Da: Leonardo da Vinci, 2006

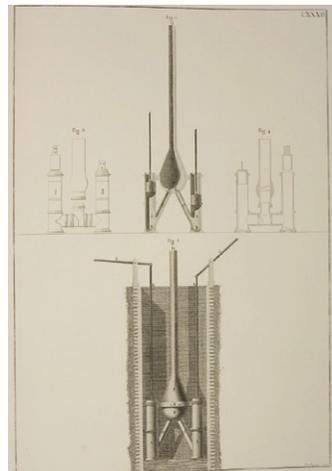
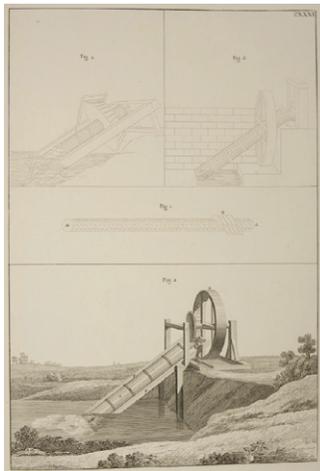
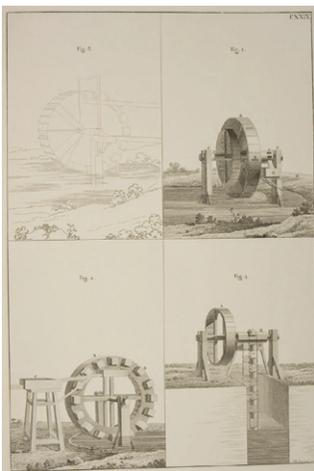
A destra: Macchina disegnata da Mariano di Jacopo (Taccola), Liber de Ingegnis, I, 38v.

Da: Taccola, 1984



Coclea in una terracotta conservata al British Museum di Londra

Macchine descritte da Vitruvio nei disegni del Marini: ruote e noria, pompa di Ctesibio, macchina di Archimede mossa da una ruota calcatrice ed un ingranaggio  
Da: Vitruvius Vitruvii Pollionis, 1836



l'inventore, sostengono fosse già conosciuta dai Sumeri e, in particolare, affermano che per alimentare i giardini di Ninive venissero impiegate pompe verticali a forma di tubi avvolti ad elica (Dalley, Olsen, 2003). Anche sulla *Enciclopedia Treccani*, alla voce Coclea, si dice che "L'invenzione di questa macchina è stata per lungo tempo attribuita ad Archimede: sembra però che essa rimonti a un tempo assai più remoto e che venisse usata già dagli antichi Egiziani per sollevare l'acqua a scopo d'irrigazione". In un articolo apparso su "Technology and Culture" si confrontano due opinioni diverse, con le rispettive motivazioni, a seguito della ricostruzione di pompe, con le tecnologie di allora, per un filmato della BBC (Dalley, Oleson, 2003). Un recentissimo lavoro sull'argomento riporta ancora in forma dubitativa questa tesi (Henderson, 2018).

Un bassorilievo, con una serie di eliche verticali contrapposte risalenti all'età del bronzo, viene riportato in questi studi a riprova di come la macchina esistesse da lungo tempo. In questo caso sembrerebbe possibile pensare a pompe a vite; in tali pompe, tuttavia, le viti richiedono per la tenuta precisioni molto elevate, impensabili per le tecnologie di allora. Liberando la fantasia, si potrebbe pensare a pompe nelle quali il verme della vite è realizzato con tubi deformabili avvolti attorno a nuclei centrali premuti l'uno contro l'altro, mentre le eliche sono opposte e ruotano in senso contrario. In questo modo la tenuta lungo il tubo si potrebbe ottenere schiacciando il tubo stesso. Se così fosse, sembra lecito sostenere che l'idea possa essere venuta osservando il trasporto lungo scale elicoidali interne ed esterne come quelle in uso nei fari o nei minareti (i due vocaboli in arabo hanno lo stesso significato) e si potrebbe anche pensare che, per ottenere una pompa più semplice e con un solo rotore, l'idea possa essere nata osservando come alcune scale a chiocciola, inclinate per

cedimenti delle fondazioni, presentassero zone riempite di acqua piovana.

La tecnologia a più rotori con tubi avvolti ad eliche contrapposte non richiede particolari soluzioni e anche oggi si possono costruire rapidamente utilizzando, anziché pelli cucite fra loro, una semplice tenuta con camera interna, o a soffietto, e con qualche elemento elastico. Si potrebbe così pensare ad una specie di macchina peristaltica come quella impiegata per pompare sangue nelle tecniche di circolazione extracorporea. In queste macchine una camera schiaccia un tubo che deformandosi fa tenuta, per poi riprendere la forma originale, separando e spostando così un certo quantitativo di liquido; qui lo schiacciamento avviene con la vite ad essa adiacente.

### TECNOLOGIA COSTRUTTIVA E MODELLI PER DIMOSTRARNE IL FUNZIONAMENTO

■ La tecnologia con la quale la macchina veniva costruita al tempo dei Romani è dettagliatamente descritta da Vitruvio che ne fornisce anche il dimensionamento in forma parametrica (Vitruvio, 1997). In sostanza, dato il diametro interno della vite, il diametro esterno viene fissato doppio, la lunghezza della vite risulta pari a sedici diametri. La circonferenza della vite interna divisa in otto parti, Vitruvio indica come tracciare i punti di riferimento di otto eliche inclinate di 45°. Si hanno così, nella lunghezza, circa cinque passi della vite. Dal punto di vista didattico può essere di interesse valutare le soluzioni per poter rendere visibile, e quindi evidente, la formazione della "tasca" e la sua forma. È dunque necessario rendere trasparente il mantello esterno. A parte la possibile soluzione, solo oggi attuabile, di

costruire insieme l'elica e il mantello con una stampante 3D, magari a tronchi da unire su di un albero centrale, utilizzando una resina trasparente, si possono pensare tre soluzioni.

Soluzione 1. Il mantello è realizzato con strisce di cristallo. Nel modello commissionato da Sebastiano Zavaglia, direttore a Bologna del Gabinetto Aldini di Fisica e Chimica Applicata, ai meccanici Antonio e Clodoveo Franchini, l'albero e l'elica, sono ottenute per fusione in bronzo mentre il tamburo esterno che ruota con la vite, è stato realizzato con strisce di cristallo, premute l'una sull'altra, che si appoggiano su di una tenuta in cuoio sistemata in uno scasso realizzato sulla cresta dell'elica. Le strisce di cristallo molato sono premute fra di loro e sul quadrante in cuoio attraverso due anelli elastici ricoperti da due fasce in ottone sottili realizzate in tolleranza di tornio. Questo modello fu molto apprezzato all'Esposizione Universale di Parigi del 1867, tanto da vincere una medaglia di bronzo. È attualmente conservato nelle collezioni del Museo del Patrimonio Industriale di Bologna.

Soluzione 2. Il mantello è realizzato con un tubo in materiale trasparente. Un modello, realizzato dagli studenti del Corso di Storia dell'ingegneria meccanica nella Facoltà di Ingegneria di Bologna nell'anno accademico 2012-2013, è ora esposto al museo Mateureka di Pennabilli. L'elica in rame è collegata al tubo interno che può ruotare su di un asse fisso; il mantello esterno è realizzato con un tubo in plexiglass, con superficie interna in tolleranza, e collocato sull'elica che porta sulla cresta una guarnizione ottenuta aprendo un piccolo tubo di teflon.

Nella soluzione adottata i cuscinetti a rotolamento sono posizionati al di sopra del livello del liquido della vasca di pescaggio, uno dei quali funge da reggisplinta.

Soluzione 3. La macchina viene realizzata secondo il disegno di Leonardo, utilizzando un tubo in materiale plastico trasparente. La sua costruzione è particolarmente semplice e mette bene in evidenza le zone riempite all'interno del tubo. Un modello è stato esposto alla mostra su Archimede tenutasi a Roma, nel 2013-14, ai Musei Capitolini.

### IL CALCOLO DELLA PORTATA

■ Vari studiosi si sono avvicendati nel tempo per calcolare la portata della macchina. Il problema non presenta una semplice soluzione dato che la "tasca" che viene separata dal liquido o dal materiale è definita dal cilindro esterno, da quello interno, dall'elica e da un piano orizzontale definito dal pelo libero (Koetsier, Blauwendraat, 2000). La soluzione è stata tentata per via analitica su di un'elica, ma anche in questo caso l'integrale è di difficile soluzione avendo un estremo del segmento definito da un massimo dell'elica. Una soluzione grafica è stata raggiunta da Weisbach sviluppando le sezioni di questo solido con cilindri aventi lo stesso asse (Weisbach, 1851-1860). Rorres propone una soluzione numerica valutando il volume della tasca tenendo conto anche delle possibili limi-

tazioni dovute al passo dell'elica con una ottimizzazione della portata della pompa dato il diametro esterno, quello interno, il passo della vite, il numero di principi (Rorres, 2000). Più semplicemente alcuni valutano empiricamente un rendimento volumetrico pari al volume della tasca e al volume racchiuso da una spirale dell'elica, spesso approssimato ad 1/3.

Si riportano le coordinate cartesiane di un'elica cilindrica di raggio  $r$  e di passo  $h$ , con asse  $z$  verticale, parametrate sull'angolo  $\varphi$  di generazione. Dopo aver ruotato l'elica sull'asse  $x$  di un angolo  $\vartheta$  si ottengono le quote dell'elica, e si possono trovare i massimi e i minimi della "tasca" (Koetsier, Blauwendraat, 2000):

$$\begin{cases} x = r \cos(\varphi) \\ y = r \sin(\varphi) \\ z = \frac{h}{2\pi} \varphi \end{cases} \quad \begin{cases} x'r = r \cos(\varphi) \\ y'r = r \sin(\varphi) \cos(\vartheta) - \frac{h}{2\pi} \varphi \sin(\vartheta) \\ z'r = r \sin(\varphi) \sin(\vartheta) + \frac{h}{2\pi} \varphi \cos(\vartheta) \end{cases}$$

$$\frac{d z'r}{d \varphi} = r \cos(\varphi) \sin(\vartheta) + \frac{h}{2\pi} \cos(\vartheta) = 0$$

$$\cos(\varphi) = \frac{-h}{2\pi r \tan(\vartheta)} \quad \text{da cui } \varphi = \arccos\left(\frac{-h}{2\pi r \tan(\vartheta)}\right) + n\pi$$

Da notare che, intersecando la superficie elicoidale con cilindri coassiali, si ha una famiglia di eliche e, dato che il passo delle eliche rimane lo stesso, al variare del raggio varia la pendenza dell'elica.

Seguendo la via grafica proposta da Weisbach, ma approssimando le curve con parabole, piace ricordare che si

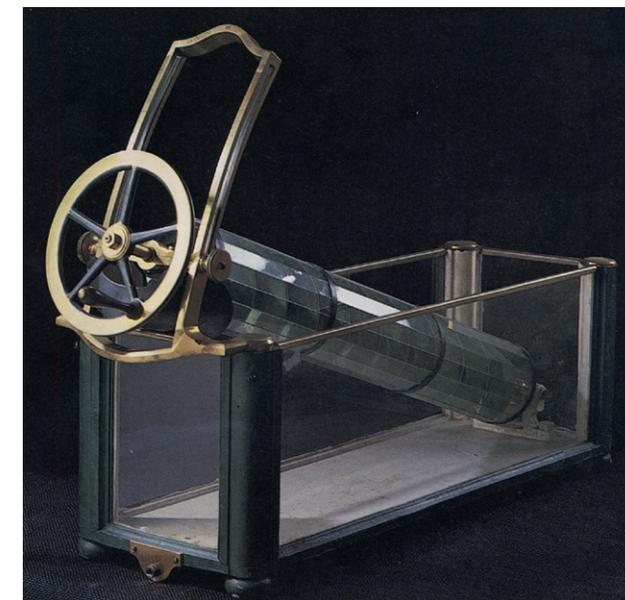


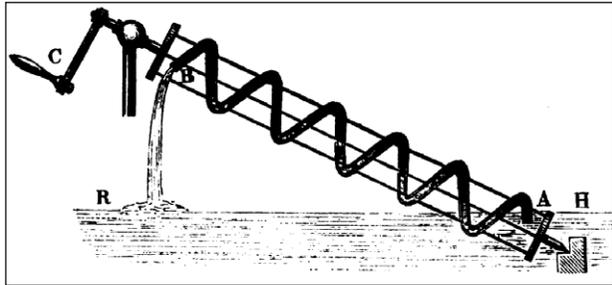
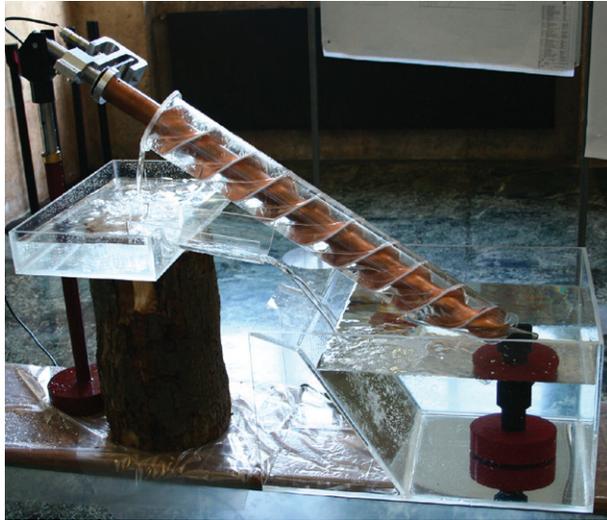
Colonne a spirale in una facciata a Tell al Rimah del II millennio a.C., pl. XXXII b.

Da: Oates, 1968

Modello di vite di Archimede del Gabinetto Aldini di Fisica e Chimica Applicata, ora al Museo del Patrimonio Industriale

Da: Comune di Bologna, *Macchine Scuola Industria*, Bologna, il Mulino, 1980





Macchina realizzata a Bologna dagli studenti del Corso di Storia dell'Ingegneria meccanica nell'a.a. 2012-13, oggi al Museo Mateureka di Pennabilli (Rimini)

potrebbe tentare una soluzione analitica. In questo caso si potrebbe ripercorrere la strada degli studi di Archimede al quale si deve il calcolo dell'area della parabola con il metodo di esaustione. Il metodo fu poi esteso da Archimede per il calcolo dei volumi di paraboloidi intersecati da piani (Archimede, 1974).

### Bibliografia

Archimede, 1974. *Opere*, a cura di Attilio Frajese, Utet, Torino  
 Archimede. *Arte e scienza dell'invenzione*, 2013. Giunti, Firenze

Dalley Stephanie, Oleson Peterson, 2003. *Sennacherib, Archimedes, and the Water Screw. The Context of Invention in the Ancient World*, "Technology and Culture", vol. 44, n. 2, pp. 1-26

Del Monte Guido Ubaldo, 2013. *Sulla Coclea Libri Quattro*, Traduzione e cura di Elena Magnini e Pier Gabriele Molari, Arnaldo Forni, Sala Bolognese

Henderson Georgina J., 2018. *Turn, Turn, Turn. The Construction of the Architectural Spiral Fluted Column in the Ancient Mediterranean World*, "Technology and Culture", vol. 59, n. 2, pp. 363-409

Koetsier Teun, Blauwendraat Hendrik, 2000. *The Archimedeean Screw-Pump. A Note on its Invention and the Development of the Theory*, "Journal of Hydraulic Engineering", vol. 126, n. 1, pp. 181-194

Leonardo da Vinci, 2006. *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*, Giunti, Milano

Magnini Elena, Molari Pier Gabriele, 2016. *Archimedes' Screw in the Four Books "De Cochlea" by Guido Ubaldo del Monte [Santa Maria] - Venice - 1615: The Engineering and the Language*, in Sorge Francesco, Genchi Giuseppe (Eds.), *Essays on the History of Mechanical Engineering*, Springer, New York, pp. 255-271

Molari Luisa, Molari Pier Gabriele, 2006. *Il trionfo dell'ingegneria nel fregio del Palazzo ducale d'Urbino*, ETS, Pisa

Oates David, 1968. *The excavation at Tell Al Rimah, 1967, "Iraq"*, vol. 30, n. 29, pp. 115-138

Oleson John Peter, 2002. *Well-Pumps for Dummies: Was there a Roman Tradition of Popular, Sub-literary Engineering Manuals?*, in Minozio Franco (a cura di), *Problemi di macchinismo in ambito romano*, Comune di Como - Musei Civici, Como, pp. 65-86

Rorres Chris, 2000. *The Turn of the Screw. Optimal Design of an Archimedes Screw*, "Journal of Hydraulic Engineering", n. 1, pp. 72-80

Simms Dennis L., 2010. *Adventures of an Innovation Over Two Millennia. The Water-Screw and its Variants*, "Atti della Fondazione Giorgio Ronchi", Firenze, anno LXV; part I: *Origins and Design*, n. 2, pp. 195-215; part II: *In and Out of Use*, n. 4, pp. 487-502; part III: *Back in Use*, n. 5, pp. 643-678

Taccola Mariano, 1984. *De ingeneis*, a cura di Giustina Scaglia, Frank Prager, Ulric Montag, 2 voll., Ludwig Reichert, Wiesbaden

Vitruvius Vitruvii Pollionis, 1836. *De architectura libri decem*, a cura di Luigi Marini, Marini, Roma

Vitruvio, 1997. *De Architectura*, a cura di Pierre Gros, 2 voll., Einaudi, Torino

Waters Shaun, Aggidis George A., 2015. *Over 2000 years in review. Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", n. 51, pp. 497-505

Weisbach Julius, 1851-1860. *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik in drei Theilen. Dritter Theil: die Zwischen- und Arbeitsmaschinen enthaltend. Zweite Abtheilung: Die Arbeitsmaschinen*, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, pp. 811-828

### Descrizione operativa di Vitruvio liberamente adattata dal De Architectura, Libro X. Cap. VI

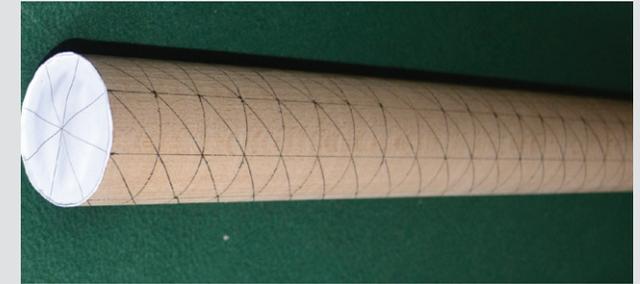
Esiste poi anche il sistema della vite, che è in grado di tirar su una grande quantità di acqua, anche se non di sollevarla altrettanto in alto quanto fa la ruota. Il metodo con il quale si realizza è il seguente.

Si prende una trave tale che il suo spessore in pollici sia equivalente alla lunghezza calcolata in piedi. La si rende perfettamente cilindrica. All'una e all'altra delle sue estremità le circonferenze andranno divise con il compasso, tracciando quadranti e ottanti, in otto tratti e le linee avranno una posizione tale che, se la trave è posta orizzontalmente, i diametri delle due estremità corrispondano perfettamente gli uni agli altri e che vengano su di essa tracciati intervalli sulla lunghezza della trave distanti fra loro un ottavo di circonferenza. Inoltre, disposta la trave in orizzontale, andranno tracciate secondo la livella linee rette da una estremità all'altra: si otterranno in questo modo intervalli uguali sia nel senso della circonferenza sia della lunghezza.

Così le rette tirate nel senso della lunghezza formeranno sul loro tracciato delle intersezioni e, nelle intersezioni, dei punti notevoli.



Una volta tracciati correttamente in questo modo questi segni, si prende un elemento sottile di salice o di agnocasto, lo si spalma di pece liquida e lo si fissa nel primo punto d'intersezione. Lo si porta poi in diagonale sulle intersezioni successive delle linee longitudinali e circolari; e così via a mano a mano che avanza, passando per ciascun punto, uno dopo l'altro e avvolgendosi intorno, si fissa a ciascuna intersezione e così, ripetendo dal primo all'ottavo punto si raggiunge la linea nella quale si trova fissata la sua estremità iniziale e vi si fissa. In questo modo essa copre una distanza uguale, sia nel percorso fino al punto sia in quello in diagonale, attraverso gli otto punti. Con lo stesso procedimento, altri elementi fatti passare attraverso tutti gli intervalli della lunghezza e della



circonferenza, fissati obliquamente a ciascuna intersezione formano, attraverso le otto divisioni dello spessore del cilindro, dei canali a spirale, ad imitazione corretta e fedele alla natura della chiocciola.

Si fissano ancora degli elementi spalmati di pece liquida lungo questo tracciato, gli uni sugli altri, e si accumulano

finché lo spessore totale non risulti uguale a un ottavo della lunghezza; al di sopra vengono messe tutt'intorno, e fissate allo scopo di rivestire la spirale, delle tavole. Si impregnano allora di pece queste tavole e si fissano mediante cerchiature di ferro in modo da evitare che la pressione dell'acqua le sconnetta. All'estremità della trave centrale sono realizzati perni in ferro.

A destra e a sinistra della vite poi si dispongono dei sostegni sui quali sono inseriti cuscinetti di ferro entro i quali si introducono i perni; e così le eliche, messe in moto dagli uomini con la pressione dei piedi, compiono le loro rotazioni. Il suo sviluppo in altezza poi dovrà essere stabilito secondo un'inclinazione tale da avere, conformemente

alla figura del triangolo rettangolo di Pitagora, le stesse proporzioni, ovvero in modo che, per una divisione della lunghezza in 5 parti, l'elevazione dell'estremità superiore della vite sia di tre di queste parti, mentre la distanza fra la verticale e le bocche che si trovano in basso sarà uguale così a 4 di queste parti.



Tracciatura del cilindro interno della coclea con otto eliche inclinate di 45°

Costruzione delle eliche con strisce ricavate dalla corteccia di alberi palustri  
 Da: Oleson, 2004

Costruzione delle eliche con vimini  
 Da: Luca Novelli, *Archimede e le sue macchine*, Editoriale Scienza, Trieste, 2008

Disegno di una coclea con tubo esterno trasparente  
 Da: Weisbach, 1851-1860